

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 5 日現在

機関番号：24501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887030

研究課題名(和文) 輻射輸送理論による偏光研究と星・惑星形成領域への応用

研究課題名(英文) Study of polarization with radiative transfer theory and application to star/planet-forming regions

研究代表者

福江 翼 (Fukue, Tsubasa)

神戸市外国語大学・外国語学部・准教授

研究者番号：30569629

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光の偏光状態まで含めた輻射輸送の数値計算コードをモンテカルロ法を用いて開発を行った。とくに光の散乱過程に焦点をあてて研究を進めた。また、散乱体の状況が均一ではない場合の影響も考慮し、どのような影響が生じるのか計算も試みた。すると散乱体の不連続な状況が見えやすい場合も見られた。偏光計算を通じて望遠鏡観測と理論とをつなげていくことで、星・惑星形成領域など天体現象の理解がますます深まることが期待される。

研究成果の概要(英文)：We develop a Monte Carlo radiative transfer code, considering the polarization state of photon. We focus on scattering process of photon in this study. We also consider the case where the condition of scatterers is not homogeneous. And we study how it influences polarization. In some cases, a situation with discontinuity appears. With computation of polarization, the link between observations and theories could yield further understanding of astronomical objects such as star/planet-forming regions.

研究分野：天文学

キーワード：偏光

1. 研究開始当初の背景

星や惑星が生まれる宇宙の領域は「星・惑星形成領域」と呼ばれる。具体的には、塵粒子やガスが集まった雲である。ひろがった雲の中から、次第に若い星と、その周囲に円盤状の雲が形成され、やがて原始惑星系円盤と呼ばれる円盤状の雲が生じると考えられている (Williams, J. P. & Cieza, L. A., 2011, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49, 67)。また、原始惑星系円盤から惑星が生まれると考えられている。惑星上には生命誕生の可能性も考えられている。ただし、これらの形成・進化の詳細は現在の観測能力の限界もありはっきりとしていない問題も少なくない。

さて、光は電磁波であり、波の性質を持っている。偏光とは電磁波の振動の方向が規則的な状態の光のことを指す。光の偏光の状態は、直線偏光成分と円偏光成分から表現することができる。振動方向が一定のものを直線偏光と呼び、光の振動の軌跡が円を描く場合を円偏光と呼ぶ。

また、どれくらい偏光しているのかという偏光の割合を表すものを偏光度と呼んでいる。まったく偏光していなければ偏光度は0%と表され、完全に偏光していれば偏光度は100%と表される。さらに、直線偏光や円偏光についてそれぞれの偏光の割合を考えることもできるので、直線偏光の割合を直線偏光度、円偏光の割合を円偏光度と呼んでいる。

天体における偏光の性質を理解することで、星・惑星形成領域のような、星に照らされた周囲の物質の分布や構造を、偏光をもった散乱光等を通じて調べることができる。たとえば次のような状況が考えられる。星・惑星形成領域では、その形成や進化において重要な役割を担うものとして、その領域に浮遊する塵粒子が挙げられる。塵粒子の(光学的)特性は塵粒子の組成や形状、サイズ分布等に依存している。この特性は、光が塵粒子に散乱される際にその偏光状態に反映される。そのため偏光観測は、このような塵粒子の性質や塵粒子の空間分布・天体の3次元的な構造を明らかにすることに大きな力を発揮する (Hough, J. H., 2007, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 106, 122)。

一方、偏光を観測するには特殊な観測装置が必要なため、近年まで十分な観測は行われていなかった。しかしながら近年、星形成領域や原始惑星系円盤などの若い星周囲の構造の偏光撮像観測が本格的に始まりだした。南アフリカでの IRSF 望遠鏡に設置された近赤外域での偏光の撮像観測装置 SIRPOL によって星形成領域を中心に広域の偏光観測が進められてきた。たとえば、オリオン大星雲に巨大な空洞が SIRPOL による直線偏光の観測で初めて示された (Tamura, M., et al. 2006, *The Astrophysical Journal*, 649, 29)。

また、すばる望遠鏡に設置された近赤外域での偏光撮像観測装置により、高空間分解能を用いた、星形成領域や原始惑星系円盤、原始惑星系円盤の消失後に現れる(塵等でできた)残骸円盤などの観測情報が蓄積され始めていた (Tamura, M., et al. 2006, *The Astrophysical Journal*, 641, 1172)。

さらに、オリオン大星雲の円偏光の大きな広がりが見られるなど (Fukue, T., et al. 2010, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 40, 335)、円偏光の観測も進められてきた。また、直線偏光と円偏光観測のデータを合わせて、どのような物理量が引き出せるかを観測成果と、星形成領域の偏光の理論モデルを合わせながら理解が深められていた (Fukue, T., et al. 2009, *The Astrophysical Journal Letters*, 692, 88)。

また、宇宙の生命や、地球の生命の起源に関して、近年国際的にも発達してきている学問としてアストロバイオロジーが挙げられる (Des Marais, D. J., et al. 2008, *Astrobiology*, 8, 715)。わたしたちのような生命の起源と、星形成領域の円偏光の関連性についても研究が進められてきており (Fukue, T., et al. 2010, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 40, 335)、偏光という観点からアストロバイオロジーへの貢献も広がりつつある。

さらに最近ではすばる望遠鏡などにより円盤状の雲などの詳細な偏光観測も進められている (Hashimoto, J., et al. 2011, *The Astrophysical Journal Letters*, 729, 17; Avenhaus, H. et al., 2014, *ApJ*, 781, 87)。また、星形成領域で非対称な円偏光の広がりが観測されている (Kwon, J., et al., 2013, *The Astrophysical Journal Letters*, 765, 6)。

これらのように偏光の観測は増えてきており、宇宙の偏光の仕組みをしっかりと説明できるような、偏光の理論的な理解を深めることがますます重要になっている。

2. 研究の目的

研究の最終目的は宇宙の偏光の総合的な理解である。とくに、偏光を取り入れた汎用性に富む輻射輸送計算のプログラム開発を進め、宇宙の偏光の理論的な理解を行うことであり、今後の研究の大きな方針となっている。

本研究においては、とくに星・惑星形成領域における散乱による偏光の理解を深める。そのために、偏光まで含めて計算できる光の散乱過程のプログラム開発に焦点をあてる。同時に、実際の観測にどのような理論的な応用ができるかについても考察を進める。このようにして、天文学における偏光の研究を推し進めることを目標としている。

望遠鏡による偏光の撮像観測においては、偏光の二次元マップとしての観測結果が得られている。偏光という情報量が増えるので、天体現象の理解がさらに深まることが期待

される。そこで、望遠鏡による偏光観測と、偏光の理論とを密接につなげていけるような、偏光の数値計算や理論的な研究が重要になる。特に、天文学における偏光研究は比較的若い分野であることもあって、新たな情報を引き出せるように計算の内容を把握しつつ、計算結果の深い解釈や、プログラムの拡張など新しい計算に向けて柔軟な対応をしていけるように独自に開発を行い、知見や経験の獲得を重ねていくことも研究のポイントになっている。

3. 研究の方法

偏光の状態の表現の仕方はいくつか知られているが、本研究ではストークスパラメータを採用する。ストークスパラメータは、 $\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}$ のように表現される。ここで、 I は強度、 Q および U は直線偏光、 V は円偏光に対応している。偏光の計算のためには1成分だけでなく、これらの成分に対応できる計算を考えていくことになる。

Q と U がわかれば、直線偏光の角度についても考えることができるので、直線偏光のベクトルマップについても描画することができるようになる。

ストークスパラメータを用いると、偏光度、直線偏光度、円偏光度は、それぞれ次のように表現される。

$$\frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}, \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \frac{V}{I}$$

この表現においては値は0から1までの値を取りうるが、値を100倍することにより、偏光度をパーセントとして表示することができるようになる。

光が散乱される際には、行列計算を用いることで、ストークスパラメータが散乱により次のように変化すると考えることができる (Whitney, B. A. & Wolff, M. J. 2002, *The Astrophysical Journal*, 574, 205)。入射光のストークスパラメータを $\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}$ 、散乱後のものを $\begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix}$ とすると、

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix}$$

のように表すことができる。偏光がどのように変化するかは散乱体に依存するが、この行列の各成分により偏光の変化を表現することができる。完全偏光だけでなく部分偏光についても考慮する。

光が計算空間中においてどのように散乱されていくかについては、輻射輸送の数値計算コードをモンテカルロ法を用いて開発を

進める (e.g., Wolf, S., Voshchinnikov, N. V., & Henning, T. 2002, *Astronomy and Astrophysics*, 385, 365; Lucas, P. W. et al., 2005, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 35, 29)。

偏光を含んだ散乱計算においては光の散乱時における散乱面が必要になる (Fischer, O., Henning, T., & Yorke, H. W. 1994, *Astronomy and Astrophysics*, 284, 187)。そこで、光の移動や散乱などを通して、軸の移動や回転も含めて計算を追っていけるように開発する。光が散乱されるたびに、モデル空間中の散乱体に対応した散乱行列によりストークスパラメータが変化していく。散乱を繰り返すにつれて光は弱くなりうるが、光がモデル空間の外に出る前に十分に値が小さくなったとみなす場合にはその光の計算は終了される。その判断に用いる閾値は計算開始前に設定される。

計算空間としては、計算の速度を考慮して、空間をセルに分割した上で光を進めていく手法を採用する (e.g., Kurosawa, R. & Hillier, D. J. 2001, *Astronomy and Astrophysics*, 379, 336)。光が進行していく際に固定されたステップで進むのではなく、モデル空間を多数のセルに分割し、光線がセルを横切る距離を利用して光を進ませる。散乱体が濃い場所はセルを多く、薄い場所はセルを少なくすることで、セルを横切る回数を減らすことができ、計算の効率を上げることが意図されている。ひとつのセルの中では散乱体は一様とする。計算の最初に散乱体の分布に従って空間を次々に8分割していき、メモリ上に記憶させる方法を取り入れる。散乱体の空間分布については計算開始前に関数で設定する。

高精度な観測成果などを考慮すると、必ずしも対称性が良いとは限らず、今後そのような状況がますます重要になっていくことも考えられる。光の散乱過程については3次元空間として取り扱う。また、空間の座標系としては直交座標系を用いる。

4. 研究成果

計算モデルとしては、星・惑星形成領域を意識した典型的な例として、散乱体を円盤状に空間分布させてテスト計算を行いながらプログラムの開発を進めた。

計算では空間の中心に光源を設置し、光源からは無偏光の光をさまざまな方向に射出する。つまりストークスパラメータの Q , U , V がいずれも0の光を射出する。

モンテカルロ法による計算においては、観測者が見る光というのは計算空間から観測者の方向にたまたま飛んできた場合に見ることができるものである。そのため、モンテカルロ法においてそのまま計算すると多くの光は観測者とは異なる方向に飛んで行ってしまいうため計算時間が膨大になってしまうという不便な点があった。そこで考案され

ていた peeling off という手法 (e.g., Wood, K. & Reynolds, R. J. 1999, The Astrophysical Journal, 525, 799) について、本研究でのプログラムにおいても採用した。光の計算過程において、ひとたび散乱が起きれば、観測者の方向に光が (モデル空間中の影響は受けつつも) 飛んでくると仮定してその重みを計算する手法である。このことで、散乱が起きるたびに観測者方向の光の計算を行うことができることになり、計算の効率が上がることが期待されるというわけである。

観測者の方向に到達した光は観測者面として集められて、ストークスパラメータが変換されて結果にまとめられる。そして各種の二次元マップとしてのデータはグラフソフトを用いて描画することができる。たとえば光学的に薄くレーリー散乱下での計算では、直線偏光のベクトルマップにおいては中心の光源の周囲を花びら状に取り巻くような分布が見られたり、偏光度マップでは比較的大きな偏光度が見られた。

一方で、偏光の過程を組み込めるようなパラメータに注意した。その際、偏光観測の成果等も考察していくなかで、散乱体の状況が均一ではない場合の影響を光の散乱の計算過程に組み込んでいけないかについても考察を進めた。計算過程において、散乱行列を変化させることができれば、空間中の場所によって異なる散乱を行うような計算を実施することができるようになる。

たとえば、散乱行列は、レーリー散乱の場合には次のような形式となる。

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(1+\mu^2) & -\frac{1}{2}(1-\mu^2) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}(1-\mu^2) & \frac{1}{2}(1+\mu^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix}$$

ただし、 $\mu = \cos \theta$ である。 θ は散乱角である (Voshchinnikov, N. V. & Karjukin, V. V. 1994, Astronomy and Astrophysics, 288, 883)。

また、ミー散乱の散乱行列は次のような形式となる。

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{33} & Z_{34} \\ 0 & 0 & -Z_{34} & Z_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{pmatrix}$$

また、散乱体の偏光のあらわれ方は同じだがアルベドが場所によって異なるといった状況も考えられるだろう。これらの例のように、場所によって異なる散乱行列を用いられるようにプログラムの開発を行った。

このような計算の導入については、レーリ

ー散乱やミー散乱のように、異なる散乱体を含む状況について調べることに関わるので、将来の高精細な撮像観測などとの比較を行う上での手がかりとなりうる点でも重要であると考えられる。

さらにプログラムを用いて、散乱体の状況が空間の場所によって変化する場合にどのような影響が生じるのかについて、光学的に薄い状況を想定し、モデル空間における場所によって物理量が異なる散乱体を設定して計算を試みて調べてみた。円盤中に散乱体の異なる塊などを置いて計算してみた。すると散乱体の不連続な状況が見えやすい場合も見られた。このような計算は今後、たとえば星周円盤における散乱体の不連続な分布を調べるような研究などにも応用できることが期待される。偏光観測と関連する理論などを偏光計算によりつなげることができれば、将来の高精細な偏光観測を含めて詳しい解釈につなげられる可能性がある。一方で、光学的に薄い円盤を想定していることや、偏光が散乱角に依存していることもあって、塊の状況によってはその影響がわかりにくい場合も見られた。実際の観測との比較を行う場合において、天体の状況によっては、円盤とは散乱体が異なる塊がどのような分布をしているかなどについて詳細に明らかにしようとするとなら今後慎重な計算が必要になる場合も示唆される。

また、本研究の遂行において培った知見を、神戸市外国語大学 (兵庫県・神戸市) におけるオープンセミナー「天文学入門～宇宙の光～」(2015年9月～10月) や、大阪教育大学附属高等学校 (大阪府・大阪市) における講義「遠くの宇宙の光の手がかり」(2015年7月) 大学における講義などを通じて、教育・普及活動にも広く活かすことができた。本研究における深い経験が学生や一般向けのわかりやすい説明を考察していくことにも大きく貢献した。このようにして、天文学や宇宙、光、アストロバイオロジーといった、関連する研究分野への理解や親しみの促進に役立てることができた。今後も新しい知見を広く伝えていくことに役立てられることが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計1件)

福江 翼, 「円盤状構造の一部に塊が含まれる場合の直線偏光計算」, 日本天文学会2016年春季年会, 2016年3月14日, 首都大学東京 (東京都・八王子市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福江 翼 (FUKUE, Tsubasa)

神戸市外国語大学・外国語学部・准教授

研究者番号：30569629